

DAÑOS POR IMPACTO EN FRUTOS: PARAMETROS Y METODOS EXPERIMENTALES.

M. Ruiz Alrisent
J. Gil Sierra
C. García Alonso
L. Rodríguez Sinobas
Dept. Mecanización Agraria.
E.T.S.I. Agrónomos. U. Politécnica de Madrid.

Abstract

Studies of impacts on fruits are based on mechanical models, on which consideration of viscoelasticity is essential, as well as for static loading. It is possible to investigate the response of fruits to static loadings by well-known methods, although not generally standardized yet; the response to dynamic loading (impacts) needs new methods of testing and analysis. The result of impact on fruits like pears and apples is bruising, whose nature and development also needs further study.

Resumen

El estudio del impacto en frutos se realiza sobre la base de modelos mecánicos del impacto en sólidos; la naturaleza viscoelástica de los productos biológicos exige la utilización de modelos viscoelásticos, tanto en el caso del impacto como de las cargas estáticas. La respuesta de los frutos a la aplicación de cargas estáticas puede investigarse con métodos bien conocidos, aunque aún no tipificados de forma general; la respuesta a cargas dinámicas (impactos) requiere de métodos de ensayo y análisis específicos que han de ser investigados. El resultado de la aplicación de los impactos en frutos como la pera y la manzana es la aparición de magulladuras, cuya naturaleza y desarrollo exige mayores estudios.

1. Introducción.

Las cada vez más altas exigencias de calidad impuestas a los productos hortofrutícolas, y la especial susceptibilidad de los mismos a los daños durante la recolección y el transporte, plantean la necesidad de conocer en profundidad su comportamiento frente a diversas agresiones mecánicas, como son la compresión y el impacto, entre sí y contra diversos objetos rígidos. El resultado de una compresión o de un impacto en un fruto que sobrepasen la resistencia del mismo es la aparición de transformaciones y/o roturas del tejido en la zona afectada, con el subsiguiente desarrollo de una magulladura: zona del fruto alterada física y químicamente (Dal Fabro et al 1980, Mohsenin, 1970).

Las pérdidas económicas debidas a esta causa son incalculables. Se han realizado estudios (O'Brien, M., et al 1978) que señalan los puntos, dentro del proceso seguido --

por el producto desde el campo hasta el consumidor, y las causas más importantes que producen las señaladas pérdidas. Son éstas:

<u>Campo</u>	<u>Transporte</u>	<u>Transformación</u>
. método de recolección.	. recipientes, contenedores.	. tiempo de espera.
. sistema de cultivo.	. suspensión del vehículo.	. tiempo de almacenamiento
. madurez de los frutos.	. tiempo de transporte.	. equipos de descarga y manipulación.
. turgencia de los frutos.	. distancia de transporte.	. temperatura.
. temperatura de los frutos.	. condiciones de la carretera	
. tiempo de espera	. temperatura ambiente.	
. podredumbres naturales.	. operaciones intermedias como clasificación, muestreo, enfriamiento, etc.	

Aunque se ha avanzado considerablemente en los procedimientos mecánicos para la recolección y el transporte de frutos destinados a la transformación, este no es el caso para frutos destinados al mercado en fresco; en éstos, las pérdidas por daños son mayores, en comparación con las que se producen en la recolección manual (Sims et al, 1983, Bilanski et al, 1984) lo que hace imposible en la práctica recolectarlos mecánicamente.

La consecución de una operación aceptable de recolección mecánica exige la combinación de diferentes líneas de investigación, como son: diseño adecuado de los sistemas mecánicos y utilización de materiales (frutos) resistentes a los daños, para lo cual es necesario avanzar en el conocimiento de las propiedades que confieren resistencia a los productos.

El impacto se diferencia de la carga cuasi-estática en que las fuerzas producidas en la colisión se aplican y retiran en un lapso de tiempo muy pequeño, del orden de 3 milisegundos.

Para alcanzar resultados en la reducción de los daños mecánicos a los frutos es necesario conocer en detalle los mecanismos de fallo de los tejidos, con el fin de a) poder mejorar la resistencia de los materiales biológicos; b) aplicar diferentes tratamientos; o c) modificar los métodos de manejo.

El objetivo del presente trabajo bibliográfico es recoger todos los aspectos publicados relacionados con este tema, como base de trabajo de los proyectos actualmente iniciados por el Departameanto de Mecanización Agraria. Se incluyen igualmente unos primeras observaciones realizadas - durante los primeros meses de actuación, como avance de progreso de los resultados esperados en el futuro.

2. Bases para el estudio del impacto en frutos.

La mecánica del fallo del tejido del fruto, debido a cargas cuasi-estáticas o dinámicas está siendo estudiada con cierta amplitud en los últimos años. Los investigadores enfocan sus trabajos desde diferentes puntos de vista, y se plantean diferentes objetivos.

El modelo del contacto elástico, basado en la teoría de Hertz ha sido aplicado, y con él se han obtenido algunas buenas aproximaciones de resultados, referentes, por ejemplo a: alturas máximas de caída libre soportables por ciertos frutos en determinadas condiciones (Nelson y Mohsenin 1968; Horsfield et al, 1970, Jindal y Mohsenin, 1976; Rider et al, 1973); proporcionalidad del volumen de magulladura a la energía de impacto aplicada (Diener et al, 1979, Holt y Schoorl, 1977, Chen y Sun, 1981); posición del inicio de la magulladura en coincidencia con las tensiones de compresión y tangenciales o deformaciones máximas calculadas (Horsfield et al, 1970; Mohsenin, 1970; Chen y Sun, 1984 Segerlind y Dal Fabro, 1978).

Manor (1978) expone que cualquier fenómeno de impacto sobre un material vegetal (frutos en particular) puede considerarse como un fenómeno en que predominan los efectos inerciales. Jarimopas (1984) considera que en la colisión de dos o más objetos se produce la adición de dos efectos principales: el contacto en sí, en la zona en que éste se produce, y la propagación de las ondas generadas por el mismo. Por lo tanto, la aplicación de la teoría del cuerpo rígido y del contacto elástico de Hertz debe aplicarse con gran precaución, pues puede conducir a conclusiones erróneas.

Chen y Sun (1984) aplicaron impactos sobre probetas cilíndricas, con el objetivo principal de detectar si el criterio de rotura puede basarse en el de la deformación crítica, dentro del modelo elástico. La importante influencia de la velocidad de deformación sobre la deformación crítica en la rotura de las probetas de manzana pone en evidencia la importancia de considerar el tejido de los frutos como un material viscoelástico, no pudiéndose aplicar, por tanto, el modelo elástico. Mohsenin (1977) ya había postulado que el comportamiento mecánico de la manzana está caracterizado por una viscoelasticidad no-lineal, anisotropía y alta deformabilidad, incluso al nivel de pequeñas tensiones.

Considerando todos estos aspectos del problema, a parecen discrepancias muy importantes en los resultados publicados referentes a los parámetros que definen el comportamiento de los frutos frente al impacto, y en las relaciones entre el impacto y la compresión cuasi-estática.

Varios investigadores (Chuma et al, 1978; Finney y Massie, 1975; Holt y Schoorl, 1977; Wright y Splinter, 1968 Fridley et al. 1968) establecen que la energía necesaria para causar magulladuras o "rotura" en impacto, es más alta que la necesaria bajo condiciones de cargas lentas. Asimismo Holt y Schoorl (1977) muestran (para la manzana) que una magulladura de "tamaño equivalente" requiere, en impacto, la disipación de 1,5 a 2,0 veces la energía necesaria para el caso de cargas lentas. Por su parte, Wright y Splinter -- (1968) indican que los valores de la energía "de rotura" -- por impacto son aproximadamente el 20% de los valores de la energía de rotura bajo carga lenta. Todos estos investigadores han utilizado tipos muy diferentes de técnicas experimentales, y se han basado en el modelo elástico de comportamiento de los frutos.

Recientemente, Jarimopas (1984) determina también valores más altos de energía absorbida en impacto que en la carga cuasi-estática. Los resultados de ensayos cuasi-estáticos realizados en manzanas aparecían muy similares a los ensayos de impacto en varios aspectos: curvas de fuerza-deformación (para deformaciones de 2-4 mm en ambos tipos de ensayos), niveles de fuerzas de bio-fluencia, y capas de rotura observadas en la magulladura; observa comportamiento elástico en los ensayos cuasi-estáticos, en contradicción con la generalmente aceptada consideración viscoelástica -- del tejido de la manzana, la cual, por otro lado, proporciona la explicación fundamental de las diferencias observadas -- (entre impacto y cargas lentas) en fuerzas, tensiones y deformaciones.

El modelo viscoelástico de comportamiento fue utilizado inicialmente por Hamann (1970) el cual resolvió el problema para el contacto de dos cuerpos, calculando las deformaciones, presiones en la superficie de contacto y tensiones internas, basándose en las ecuaciones desarrolladas anteriormente por Yang (1966); asumió carga cuasi-estática y modelo viscoelástico formado por un solo término exponencial. Rumsey y Fridley (1977) utilizan este modelo, con varios elementos exponenciales y resuelven su análisis, obteniendo buenos ajustes a los resultados experimentales únicamente para pequeñas deformaciones cuasi-estáticas. Chen -- y Chen (1984) realizan un modelo de elementos finitos para un sólido de dos dimensiones, el cual introduce viscoelasticidad y efectos inerciales. Aplican el modelo a impactos en manzanas, y los resultados, en concordancia con el modelo viscoelástico, muestran que la fuerza y presión máximas y la deformación máxima aparecen antes (en el tiempo) a velocidades superiores de impacto. El desarrollo de este modelo --

parece que puede llegar a explicar el fenómeno del impacto desde el punto de vista teórico, pero requiere un mayor estudio.

La caracterización viscoelástica de los materiales puede realizarse experimentalmente por medio de ensayos estáticos de relajación de la tensión, y su análisis por el método numérico resuelto por Gil et al (1984). Se comprueba que al menos, existe una relación entre el modelo viscoelástico obtenido por esta vía, y la respuesta del correspondiente material a los impactos.

3. Métodos experimentales en el estudio del impacto.

Entre los distintos métodos utilizados para ensayar en laboratorio y reproducir el fenómeno con condiciones controladas, podemos destacar:

1º. Caída libre de frutos sobre superficies duras o acolchadas (Kunce et al, 1975).

2º. Caída libre de una masa sobre el fruto o fragmentos del mismo. Ej. cilindro metálico, bloque metálico -- conducido por alambres, esfera metálica (Chen et al, 1984) fruta sobre fruta (Manor, 1978) etc...

3º. Impacto producido por un péndulo simple o compuesto sobre el material, intacto o no (Jindal y Mohsenin, 1976, Fluck y Ahmed, 1973, etc).

4º. Impacto producido por un pistón neumático -- (Holt y Schoorl, 1977).

5º. Impacto producido por un proyectil impulsado por un resorte u otro mecanismo (Holt y Schoorl, 1977).

En todos los casos, la forma del material vegetal puede ser variable.

Entre los cinco métodos mencionados, los tres primeros son los más utilizados y a su vez pueden ser agrupados en dos grupos según como se encuentre el fruto durante el ensayo:

a) El fruto se encuentra en movimiento. De esta forma entre el inicio y el final del impacto existe una transferencia de momento entre el mismo y la superficie impactada y por lo tanto sólo se aplica la fuerza en un punto (el de contacto).

b) El fruto se encuentra estático y fijo. En este caso la transferencia de momento se realiza sobre el mismo por la masa impactante y por lo tanto la fuerza se aplica en el punto del impacto y en el de apoyo o fijación, con dos zonas de magullamiento.

Como ya se ha mencionado, según el autor y el método que utilice, los parámetros determinados son diferen-

tes. Según los tipos de ensayos mencionados, entre los más comunes están:

a) Caída libre de frutos:

- Altura de caída.
- Radio, profundidad y volumen de la magulladura.
- Fuerza (o aceleración).
- Tiempo de rebote.
- Energía del impacto (masa y altura).
- Tiempo del impacto (duración).
- Coeficiente de restitución (relación altura de caída/altura de rebote).

(Mohsenin et al, 1978; Diener et al, 1979; Saring et al, 1976; Kunce et al, 1975; Rumsey, 1974; Rider et al, 1973; - Manor, 1978).

b) Masa impactante:

- Altura de caída.
- Energía del impacto.
- Dimensiones de la magulladura (Volumen).
- Fuerzas (aceleraciones).
- Duración del impacto.
- Tiempo de rebote.
- Impulso cinético.

(Kunce et al, 1975; Chen y Sun, 1984; Fluck y Ahmed, 1973; Hammerle y Mohsenin, 1966; Mohsenin, 1970).

c) Péndulo simple o compuesto:

- Dimensión de la fruta (Radio de curvatura).
- Fuerza (Aceleraciones).
- Angulo inicial.
- Area de contacto.
- Duración.
- Dimensiones de la magulladura.

(Mohsenin, 1970; Jindal y Mohsenin, 1976; Horsfield et al, - 1972; Nelson y Mohsenin, 1968; Fridley et al, 1968; Diener et al, 1979).

Los tres tipos de errores observados más importantes, y que contribuyen a la discrepancia de resultados ya comentada, son los siguientes:

1º. Calibración defectuosa de los aparatos.

2º. Aplicación incorrecta (o incompleta) de la ley del impulso mecánico (considerando el problema desde el punto de vista del sólido rígido).

3º. Respuestas incorrectas por parte del equipo - de medida.

El segundo es especialmente importante ya que se ha comprobado que siempre existe una diferencia entre el impulso medido y la variación de momento, siendo además no predecible por un simple factor de corrección (Manor, 1978 y Fluck y Ahmed, 1973). La explicación de este fenómeno nos remite de nuevo a la teoría viscoelástica que indica que dentro del material existen efectos dispersivos o de atenuación de las fuerzas generadas en el impacto, lo que no ocurre si consideramos la teoría de Hertz.

La instrumentación más frecuentemente utilizada para la medida y registro de los diversos parámetros es la siguiente:

a) Para la medida de la fuerza:

- sensores piezoeléctricos dinámicos
- bandas extensométricas
- acelerómetros

b) Para la medida del desplazamiento:

- acelerómetros (por integración de las curvas de velocidad)
- transductores de desplazamiento angular (para péndulos)
- células fotoeléctricas (extensómetros ópticos), etc...

c) Para la adquisición y procesado de los datos:

- osciloscopios (con/sin memoria)
- ordenadores
- película de alta velocidad.

4. Objetivos y líneas de trabajo de los actuales proyectos.

a) Hasta ahora, pueden realizarse ensayos estáticos con mucha mayor precisión y fiabilidad, por medio de las máquinas universales de ensayos (tipo Instron), que los ensayos de impacto. Si se puede conseguir un equipo de impactos que sea capaz de determinar los mismos parámetros (fuerzas-deformaciones, etc) estaremos en condiciones de trabajar al mismo nivel al menos, que en el caso de los ensayos estáticos, abriéndose amplias posibilidades para el correcto análisis de las relaciones entre las energías producidas por impacto y por cargas estáticas en frutos.

b) Términos como deformación máxima o tensión máxima, como criterios de rotura, pueden no ser aplicables a tejidos vivos como a materiales de ingeniería. Su estructura puede hacer que ello sea imposible de forma general: dependiendo de la fracción fluída, en el tejido, dentro y fuera --

de las células, de la porosidad de éstas, de la existencia de elementos más resistentes, haces vasculares, etc., el material fallará de diferente forma, y responderá también de manera diferente frente a variaciones en las condiciones de aplicación de las cargas.

El fallo por tensiones tangenciales, que se considera como el principal criterio (alternativamente lo es la deformación máxima), sí puede serlo en ciertas condiciones de los frutos y no en otras (p.ej., en dependencia de la madurez, temperaturas, etc.). Se diseñarán ensayos que permitan aplicar tensiones tangenciales con el fin de conocer en qué casos estas tensiones son las fundamentales en la rotura del tejido del fruto.

c) Contando con el procedimiento numérico diseñado por Gil et al. (1984) existe la posibilidad de modelizar con precisión el comportamiento viscoelástico de los frutos en base a ensayos de relajación de la tensión. Pueden así detectarse diferencias en los materiales, y compararse con posibles diferencias observadas en los daños producidos por impacto y por cargas cuasi-estáticas. Los diferentes parámetros que caracterizan cada uno de los elementos del modelo viscoelástico podrían aportar una explicación de los diferentes tipos de respuestas que se observan en los frutos.

d) Es necesario contar con algún medio apropiado para observar la formación y el desarrollo de una magulladura. Hasta ahora, se ha utilizado casi exclusivamente la simple observación directa y medida del volumen de tejido afectado, procedimiento que está en claro desequilibrio con los procedimientos de ensayo mecánico.

Algunos investigadores (Diehl y Ordoñez, 1982), Chen y Chen (1984) y Jarimopas (1984) intentan observar el tejido dañado por medio de microscopía electrónica. Sin embargo, parece más apropiado la utilización de magnificaciones menores para evitar manipulaciones excesivas del material.

También presenta posibilidades la utilización de radiaciones del espectro óptico, o fuera de él, como medio de destacar la zona magullada y, más adelante, como posibilidad de detección de la misma con fines de clasificación automática.

e) Considerando la constitución del tejido de los frutos, se plantea la pregunta de si el tamaño de la magulladura tal como se ha venido utilizando hasta ahora, es el mejor síntoma de la "energía absorbida"; no existe ninguna prueba que indique que las magulladuras se inician y se desarrollan de la misma forma en el tejido cuando son producidas por un impacto, como cuando la causa es una carga estática. Jarimopas (1984), intenta demostrar que son

similares, para cargas y deformaciones muy pequeñas.

f) Las condiciones ambientales pueden tener un efecto muy importante en el inicio y desarrollo de una magulladura; la temperatura de aplicación del daño, y de conservación posterior del fruto, afecta al comportamiento frente a impactos (Gil et al, 1984).

Como conclusión, es necesario desarrollar sistemas de aplicación, medida y observación de los daños para poder profundizar en su aparición y desarrollo con el fin de llegar a diseñar procedimientos que minimicen las pérdidas en la recolección y manipulación de los frutos.

Agradecimiento.

Los fondos que financian este proyecto proceden parcialmente del Comité Conjunto Hispano-Norteamericano.

Referencias Bibliográficas.

1. Bilanski, W.K. y D.R. Menzies, 1984. Bruising related to mechanical harvesting of apples and peaches. Int. -- Symposium on Fruit, Nut and Veg. Harvesting Mechanization.
2. Chen, P. y Z. Sun, 1981. Impact parameters related to injury in apples. ASAE paper no. 81-3041.
3. Chen, P. y Z. Sun, 1984. Critical strain failure criterion: Pros and Cons. Trans. ASAE 27(1): 278-281.
4. Chen, L. , P. Chen y L.R. Herrmann, 1984. Analysis of stresses in fruit during an impact. ASAE Paper no. 84-3554.
5. Chen, P., S. Tang y S. Chen, 1985. Instrument for testing the response of fruits to impact. ASAE Paper no. 85-3537.
6. Chuma, Y. y T. Shiga, 1978. Mechanical properties of Satsuma orange as related to the design of a container -- for bulk transportation. Journal Texture Studies 9: 461-479.
7. Dal Fabbro, C.M., H. Murase y C.J. Segerlind, 1980. Strain failure of apple, pear and potato tissue. ASAE paper no. 80-3048.
8. Diehl, K.C. y G.P. Ordoñez, 1982. Normal strain failure due to contact stresses. ASAE Paper no. 82-3558.
9. Diener, R.G. et al., 1979. Bruise energy of peaches and apples. Trans. ASAE 22(2): 287.
10. Finney, E.E. y D.R. Massie, 1975. Instrumentation for testing the response of fruits to mechanical impact. -- Trans. ASAE 18(6): 1184.
11. Fluck, R.C. y E.M. Ahmed, 1973. Impact testing of fruits and vegetables. Trans. ASAE 16(4): 660-666.
12. Fridley, R.B. et al., 1968. Some aspects of elastic behavior of select fruits. Trans. ASAE 11(1): 46-49.
13. Gil, J., P. Chen y M. Ruiz, 1984. Numerically calculated viscoelastic constants related to bruising resistance. ASAE paper no. 84-6502.

14. Hamann, D.D., 1969. Dynamic mechanical properties of apple fruit flesh. Trans. ASAE 12(2): 170-174.
15. Hammerle, J.R. y N.N. Mohsenin, 1966. Some dynamic aspects of fruit impacting hard and soft materials. Trans.- ASAE 9(4): 484-488.
16. Holt, J.E. y D. Schoorl, 1977. Bruising and energy dissipation in apples. Journal of Texture Studies 7(4): 421-432.
17. Horsfield, B.C., R.B. Fridley y L.L. Claypool, 1972. Application of theory of elasticity to the design of fruit - harvesting and handling equipment for minimum bruising. Trans ASAE 15(4): 746-750 (753).
18. Jarimopas, B., 1984. Failure of apples under dynamic loading. Research Thesis Israel Institute of Technology.
19. Jindal, V.K., y N.N. Mohsenin, 1976. Analysis of a simple pendulum impacting device for determining dynamic - strength of selected food material. Trans. ASAE 19(4): 766-770.
20. Kunc, O.R., W. Aldred y B.D. Reeder, 1975. Bruising characteristics of peaches related to mechanical harvesting. Trans. ASAE 18(5): 939-941, 945.
21. Manor, A.N., 1978. Critical analysis of the mechanics of fruit damage under impact conditions. Thesis in Agricultural Engineering. Pennsylvania State University.
22. Mohsenin, N.N., 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers. New York, London, Paris.
23. Mohsenin, N.N., 1977. Characterization and failure in solid foods with particular reference to fruits and vegetables. J. Texture Studies 8: 169-193.
24. Mohsenin, N.N., V.K. Jindal y A.N. Manor, 1978. Mechanics of impact of a falling fruit on a cushioned surface. Trans. ASAE 21(3): 594-600.
25. Nelson, C.W. y N.N. Mohsenin, 1968. Maximum allowable static and dynamic loads and effects of temperature on mechanical injury in apples. J. Agric. Engng. Res. 13(4): 305-317.
26. O'Brien, M., R.B. Fridley y L.L. Claypool, 1978. Food losses in harvest and handling systems for fruits and vegetables. Trans. ASAE (1978): 386-390.
27. Rider, R.C., R.B. Fridley y M. O'Brien, 1973. Elastic behavior of a pseudo-fruit for determining bruise - damage to fruit during mechanized handling. Trans. ASAE 16(2): 241-244.
28. Rumsey, T., 1974. Analysis of viscoelastic contact stress in agricultural products using a finite element method. Ph.D. Thesis. University of California. Davis.
29. Saring, Y. et al., 1976. Deformation analysis of - foam encapsulated apples under impact loading. ASAE Paper - no. 72-307.
30. Segerlind, L.J. y C.M. Dal Fabbro, 1978. A failure - criterion for apple flesh. ASAE Paper no. 78-3556.
31. Wright, F.S. y W.E. Splinter, 1968. Mechanical behavior of sweet potatoes under slow loading and impact loading. Trans. ASAE 11(6): 765-770.